

文章编号 1004-924X(2018)05-1046-08

## 刀口半影最小化的光刻机扫描狭缝研究

林栋梁<sup>1,2</sup>, 张 方<sup>1</sup>, 黄惠杰<sup>1,2\*</sup>

- (1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**扫描狭缝是步进扫描光刻机中控制曝光剂量的重要单元,而扫描狭缝产生过大的刀口半影会影响曝光性能。首先,根据步进扫描光刻机照明原理,通过分析掩模面上光强分布与扫描狭缝刀口厚度及位置的相对关系,推导出掩模面上刀口半影宽度的计算公式,同时针对数值孔径 NA 为 0.75 的光刻机照明系统模型分别对非共面和共面扫描狭缝在掩模面上的刀口半影进行仿真分析;研制了一种四刀口共面的高精度扫描狭缝装置,不仅满足步进扫描光刻机的同步性能需求,并且有效减小了 X 向和 Y 向的刀口半影;最后对所研制的扫描狭缝动态性能以及掩模面上实际刀口半影进行了测试。结果表明,当最大扫描速度达到 470 mm/s 时,扫描刀口动态跟随误差始终在  $\pm 30 \mu\text{m}$  以内,同时两个方向的刀口半影均不超过 0.5 mm,满足 90 nm 分辨率步进扫描光刻机的需求。

**关键词:**光学光刻;步进扫描;扫描狭缝;同步;刀口半影

**中图分类号:** TN23; TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182605.1046

## Research of scanning slit with minimal penumbra of blade's edge in lithography

LIN Dong-liang<sup>1,2</sup>, ZHANG Fang<sup>1</sup>, HUANG Hui-jie<sup>1,2\*</sup>

- (1. *Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*  
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)  
\* *Corresponding author, E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn*

**Abstract:** Scanning slit is an important element for controlling exposure dose in step-and-scan lithography. Too large a penumbra of the blade's edge in scanning slit could affect the exposure performance. Firstly, according to the illumination principle of a step-and-scan lithography, the calculation formula of the penumbra of the blade's edge at the reticle plane was derived by analyzing the relationship between the intensity distribution of the reticle and the thickness and location of the blades in the scanning slit. The theoretical value of the penumbra of the coplanar and noncoplanar blade's edges at the reticle plane was verified using the simulating light model of a 0.75 NA lithography. Secondly, a high-accuracy scanning slit apparatus with four coplanar blades was

收稿日期:2017-10-10;修订日期:2017-12-06.

基金项目:上海市科技人才计划资助项目(No. 17YF1429500);政府间国际科技创新合作重点专项资助项目(No. 2016YFE0110600);上海市国际科技合作基金资助项目(No. 16520710500)

developed, which not only meets the synchronization performance requirements of the step-and-scan lithography, but also reduces the penumbra of the blade's edges in the X and Y-direction. Finally, the dynamic performance of the scanning blades and the actual penumbra of the blade's edges at the reticle plane were also experimentally tested. The test results indicate that when the scanning speed reaches 470 mm/s, the dynamic position error of the blade is within  $\pm 30 \mu\text{m}$  and the penumbra of all edges does not exceed 0.5 mm and meets the requirements of the 90 nm step-and-scan lithography.

**Key words:** photolithography; step-and-scan; scanning slit; synchronization; penumbra of blade's edge

## 1 引 言

由于极大规模集成电路的发展,光刻技术从接触式曝光逐渐过渡到投影式曝光<sup>[1]</sup>。同时,伴随着光刻分辨率的逐渐提高,曝光系统的数值孔径也不断变大,这使得光刻投影物镜的制造变得越来越复杂。为了降低光刻投影物镜的设计难度,现代光刻机普遍采用步进扫描的方式来实现高分辨率下的大视场曝光<sup>[2-3]</sup>。步进扫描投影曝光通过掩模台和硅片台做与投影倍数相关的扫描运动,大大提高了光刻机的信息传递能力<sup>[4]</sup>。在扫描曝光过程中,为了避免曝光光束照射到相邻硅片区域,光刻机利用扫描狭缝中扫描刀片与掩模的同步运动进行动态拦光;同时,非扫描方向也通过刀片来限定掩模面照明视场以及瞬时照明的中心位置<sup>[5]</sup>。扫描狭缝在拦光过程中,狭缝刀口将在掩模面成像,此时刀口成像宽度即为刀口半影。当扫描狭缝与掩模台进行同步运动时,刀口半影不能超过掩模铬边的宽度,否则会导致相邻曝光场产生不必要的曝光<sup>[6]</sup>。

步进扫描光刻机要求扫描狭缝不仅要具有很高的扫描速度,而且还要有很好的动态性能<sup>[7]</sup>。国际上先进的步进扫描光刻机中,扫描狭缝主要采用扫描和非扫描两个方向刀口不共面的方式进行研究和设计<sup>[8-10]</sup>。非共面扫描狭缝中所有刀片相互独立,因此容易实现高速高加速的运动控制,但由于两个方向的刀口相对照明镜组的物面存在一定距离,所以扫描狭缝在掩模面上形成的刀口半影均比较大。为了不影响同步扫描时硅片面曝光剂量的精确控制,非共面扫描狭缝就要求掩模的

铬边宽度较大,这导致掩模的有效区域减少,从而影响曝光效率和光刻产率<sup>[11-13]</sup>。本文结合扫描狭缝在步进扫描光刻机中的应用,分析了掩模面上光强分布与扫描狭缝刀口厚度及位置之间的相对关系,推导出刀口半影计算公式,同时利用数值孔径 NA 为 0.75,光刻分辨率为 90 nm 的步进扫描光刻机照明光学系统分别对非共面和共面扫描狭缝在掩模面的刀口半影进行仿真;采用精密驱动的刀片耦合结构,研制出一种四刀口共面的扫描狭缝,在高速扫描过程中不仅具有很好的动态特性,并且在掩模面产生的刀口半影也较小,有利于提高步进扫描光刻机的同步曝光性能。

## 2 扫描狭缝刀口半影

步进扫描光刻机主要曝光系统如图 1 所示,其中 Z 向为光轴方向,Y 向为掩模台和硅片台的扫描方向,X 向为非扫描方向。步进扫描光刻机曝光系统主要包括微透镜阵列、聚光镜组、扫描狭缝、照明镜组、掩模、投影物镜和硅片。当入射激光束经微透镜阵列与聚光镜组匀光后,在聚光镜组后焦面上形成均匀照明光场。该均匀光场经过照明镜组放大后,通过物镜将掩模面上的掩模板图形成像到涂胶硅片上<sup>[14]</sup>。聚光镜组后焦面处设置视场光阑,以确定照明视场的大小,同时在照明镜组物面设置扫描狭缝,两者之间沿光轴方向有一定距离。由图 1 可知,扫描狭缝面与掩模面、掩模面与硅片面均呈共轭关系。实际曝光过程中,掩模台和硅片台分别带动掩模和硅片沿水平方向做扫描运动,同时扫描狭缝沿 Y 向的刀片配合掩模面进行同步运动。

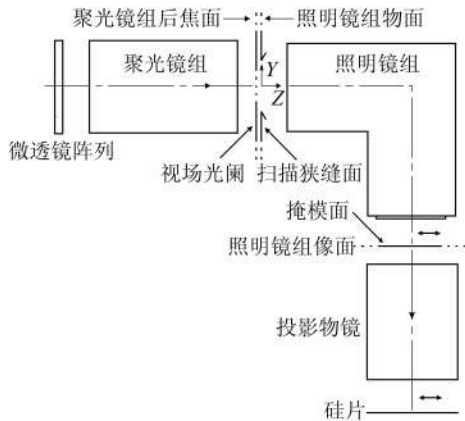


图 1 步进扫描光刻机曝光示意图

Fig. 1 Exposure diagram of step-and-scan lithography machine

步进扫描光刻机采用准分子激光器作为光源,激光器的脉冲稳定性直接影响曝光剂量的均匀性,而步进扫描光刻机通常采用梯形照明来改善曝光剂量的不均匀性<sup>[15]</sup>。图 2 所示为步进扫描光刻机照明系统形成梯形照明光强分布的光学原理图。前端微透镜阵列(ROE)产生的激光束经过聚光镜组后,在聚光镜组后焦面处形成均匀的照明光场。当照明镜组的物面与聚光镜组后焦面离焦时,照明镜组的物面处即产生梯形光强。此梯形强度分布的光场经过照明镜组放大和投影物镜成像后,在硅片面上呈现的光强也为梯形,最终使得硅片上所接收的曝光能量为梯形光强的积分,以此改善曝光剂量的不均匀性。根据不同的照明积分均匀性要求,照明系统对梯形光强轮廓的要求也不同,而通过位于聚光镜组后焦面处的视场光阑尺寸可以限定光强的腰部宽度。

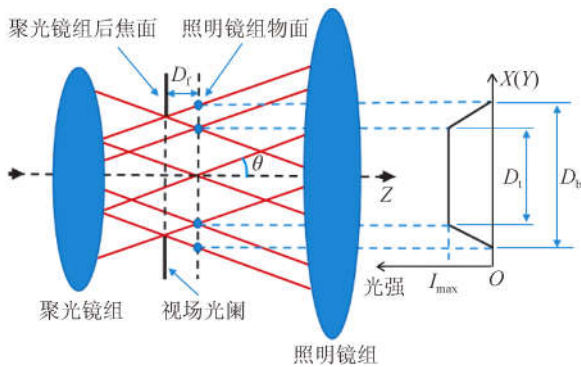


图 2 照明系统形成梯形光强分布的光学原理图

Fig. 2 Schematic diagram of trapezoidal light-intensity in illumination system

在图 2 中,  $\theta$  为照明镜组物面的光束孔径半角<sup>[13]</sup>,且:

$$\theta = \arcsin(NA_{po} \cdot \sigma_{max} \cdot \beta_{IL} \cdot \beta_{po}), \quad (1)$$

式中:  $NA_{po}$  为投影物镜的数值孔径,  $\sigma_{max}$  为照明系统的最大相干因子,  $\beta_{IL}$ ,  $\beta_{po}$  分别是照明镜组和投影物镜的放大倍率<sup>[14]</sup>。

假设照明镜组物面要求形成的梯形光强顶部和底部宽度分别为  $D_t$  和  $D_b$ 。由几何关系可知,聚光镜组后焦面与照明镜组物面的离焦量  $D_f$  应为:

$$D_f = \frac{(D_b - D_t)/2}{\tan \theta}. \quad (2)$$

理论上,照明系统中扫描狭缝的挡光刀片应位于照明镜组物面,此时扫描狭缝面与掩模面呈物像关系,掩模面处产生的刀口像最清晰,刀口成像宽度也最小。如图 3 所示,当扫描狭缝在扫描方向和非扫描方向的刀片采用非共面设计时,两个方向的刀口不可能在同一个平面内,而是分别处于照明镜组物面两侧,此时两个方向刀口在掩模面上都将产生较大的半影。

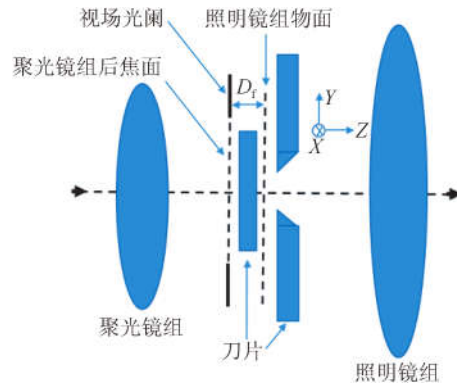


图 3 非共面扫描刀片结构图

Fig. 3 Structure diagram of non-coplanar scanning blades

图 4 所示为扫描狭缝产生刀口半影的光学原理图。假设刀片相对照明镜组物面的离焦距离为  $l$ ,且刀片厚度为  $d$ ,  $W_s$  是刀口在掩模面上产生的半影宽度。通过几何光学进行计算,可得:

$$W_s = (2l + d) \cdot \tan \theta \cdot \beta_{IL}. \quad (3)$$

对于数值孔径 NA 为 0.75,分辨率为 90 nm 的步进扫描光刻机,最大相干因子  $\sigma_{max}$  为 0.89,照明镜组的放大倍率  $\beta_{IL} = -3$ ,投影物镜倍率  $\beta_{po} = -0.25$ ,则照明镜组物方孔径半角  $\theta$  为  $30^\circ$ 。假设

非共面扫描狭缝中刀片离焦距离  $l$  为 0.2 mm,同时刀片采用楔形设计,拦光刀口的厚度为 0.02 mm,根据式(3)的计算得到,理论上掩模面内刀口像宽  $W_s$  约为 0.727 mm。实际上,扫描狭缝在拦光过程中,机械系统产生的振动、刀口的热变形以及光学系统产生的弥散斑等因素也会影响刀口的成像。当掩模面上最终的刀口像超出铬边范围时,硅片面上相邻场也被曝光,从而对相邻场的照明积分均匀性产生影响。

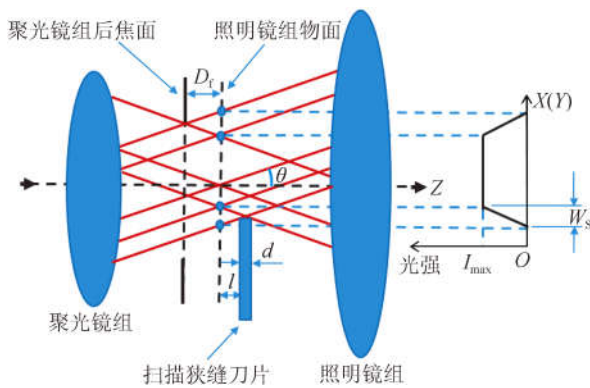


图 4 扫描狭缝刀口半影光学原理图

Fig. 4 Schematic diagram of penumbra of blade's edge in scanning slit

### 3 高精度共面四刀口扫描狭缝研制

步进扫描光刻机要求掩模面上扫描狭缝刀口半影尽可能小,同时也要求扫描刀片具有较高的动态性能,以满足光刻过程中扫描狭缝和掩模台的同步需求。

#### 3.1 结构原理

为了满足步进扫描光刻机的高性能曝光需求,本文设计了一种四刀口共面的扫描狭缝装置,其结构原理如图 5 所示。X 向为水平方向,Y 向为竖直方向。扫描曝光过程中,X 向刀片  $X_1$  和  $X_2$  做步进运动,Y 向刀片  $Y_1$  和  $Y_2$  配合掩模台做扫描运动。每个刀片均利用相互垂直的正向和垂向两级导轨进行导向,且刀片通过刀架固定在垂向导轨的滑块上。刀片采用直线电机进行线性驱动,同时通过高精度位移光栅进行位置反馈,使得每个刀片都单独构成闭环伺服系统。每个刀片

量方向均与刀口互相垂直,垂向导轨的导向与刀口互相平行。X 向与 Y 向相邻刀架之间的耦合边通过轴承和磁铁的相互作用力进行约束,构成半接触式耦合连接。当一个刀片沿正向导轨运动时,与其相邻的刀片在耦合边的约束下沿垂向导轨进行随动。四个刀片通过相互耦合的衔接后,所有刀片均可在一个平面内自由运动。由于每个刀片都能进行精密定位,当四个刀片在各自伺服系统下进行驱动时,光刻机照明系统便可产生任意的瞬时曝光视场,此时照明光场的边缘轮廓完全由刀口进行精确控制。由于四个刀片之间不直接接触,为了防止狭缝开口在四个拐角处漏光,相邻刀片在配合边采用楔形重叠设计。

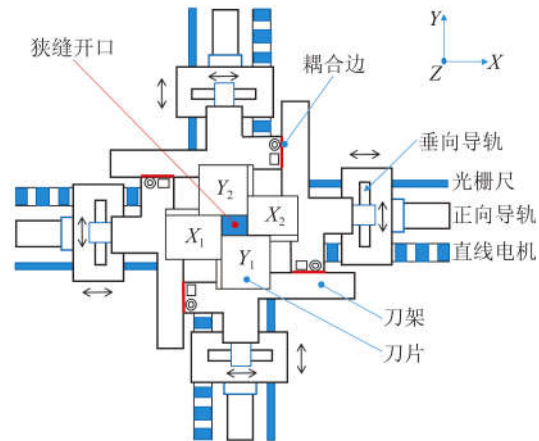


图 5 四刀口共面的扫描狭缝装置原理图

Fig. 5 Principle diagram of scanning slit with four coplanar blade's edges

#### 3.2 扫描狭缝刀口热变形计算

刀片在拦光过程中易受热产生变形,这直接影响刀口的成像轮廓,尤其刀口沿 Z 向的形变使刀口相对照明镜组物面的离焦量发生变化,进而影响刀口的半影宽度。扫描狭缝刀片材料采用铍铝合金,其各项物理性能参数为:杨氏模量  $E=200$  GPa,线膨胀系数  $\alpha=1.39 \times 10^{-5}$ ,密度  $\rho=2100$  kg/m<sup>3</sup>,热导率  $\lambda=210$  W/m·K,比热  $C=1900$  J/kg·K<sup>[16]</sup>。刀片尺寸为 50 mm×50 mm×10 mm(长×宽×高)。

扫描狭缝中四个刀片结构相同,因此仅选取其中一个刀片  $X_2$  进行热-结构耦合仿真。准分子激光器的脉冲频率为 6 kHz,脉冲能量为 10 mJ,

狭缝面光场尺寸为 35 mm(X)×14 mm(Y),能量剩余透过率为 50%,刀片表面与环境自然对流<sup>[14]</sup>。图 6 显示刀片在经过脉冲激光连续照射 1 h 后达到热平衡,此时最高温度接近 100 °C。图 7 所示为刀片达到热稳定后整体沿 Z 方向的变形图,其刀口处的最大形变约为 0.05 mm。

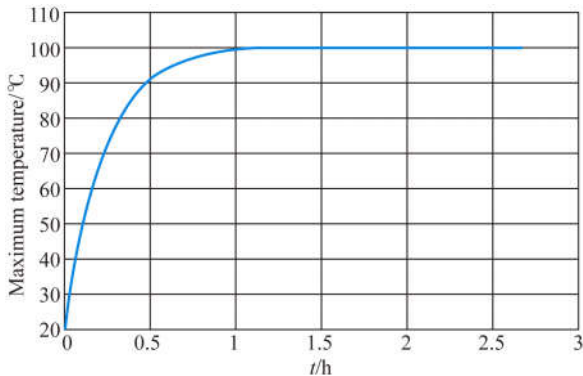


图 6 刀片最大温度随时间的变化曲线

Fig. 6 Maximum temperature graph of blade with time

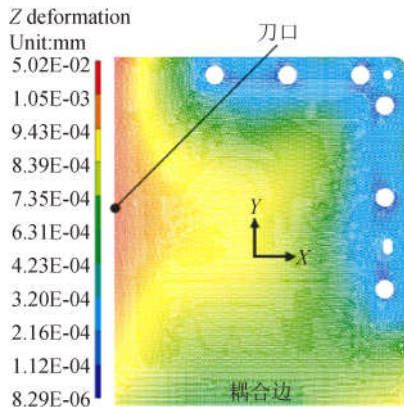


图 7 单个刀片热稳定后的变形云图

Fig. 7 Deformation pattern of blade along z direction after thermal stability

### 3.3 刀口成像仿真

图 8 是数值孔径 NA 为 0.75,光刻分辨率为 90 nm 的步进扫描光刻机照明系统在微透镜阵列 (ROE) 后端的光学系统模型,其中聚光镜组由傅里叶透镜组构成,照明镜组为双远心系统,照明镜组物面与掩模面呈共轭关系<sup>[12]</sup>。在聚光镜组像焦面处设置朗伯体面光源,光源尺寸为 10 mm×10 mm,光束发散角为 60°,扫描狭缝的开口尺寸为 1 mm×1 mm,刀口厚度设置为 0.02 mm。

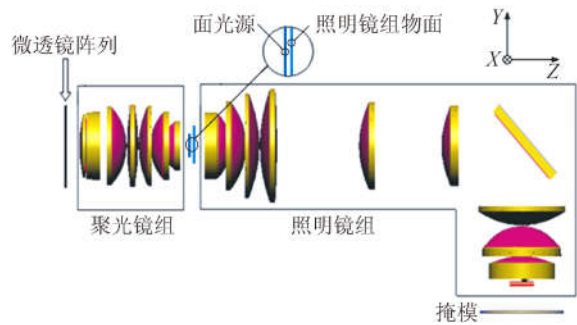


图 8 NA 为 0.75 的步进扫描光刻机的刀口半影仿真模型  
Fig. 8 Simulation model of penumbra of blade's edge in 0.75 NA step-scan lithography

首先将 Y 向刀片设置在照明镜组物面处,但 X 向刀片与 Y 向刀片沿光轴方向 (Z 向) 间距 0.2 mm,仿真得到掩模面上的光强分布如图 9 所示,结果显示掩模面上 Y 向光强呈矩形分布; X 向光强呈梯形分布,其梯形单边宽度约为 0.8 mm。当扫描狭缝改用共面四刀口设计,且四刀口均位于照明镜组物面时,在掩模面上的光强分布如图 10 所示,此时 X 向和 Y 向两个方向的光强基本呈矩形分布,几乎没有刀口半影。在共面四刀口扫描狭缝的基础上,同时加上四刀片沿 Z 方向的热变形后,重新仿真得到掩模面上的光强分布如图 11 所示,此时掩模面上沿 X 向和 Y 向的刀口半影明显变大,半影宽度约为 0.2 mm。结合理论计算和仿真分析可知,当刀片离焦量为 0.2 mm,刀口厚度为 0.02 mm 时,刀口半影的仿真值 (约 0.8 mm) 和理论值 (0.727 mm) 之间存在一定偏差,这主要与照明光学系统成像有关。由于理论计算不包括光学系统像差的影响,因此刀口半影的仿真结果略大于计算值,其差值与光学系统仿真得到的弥散斑直径基本相同。

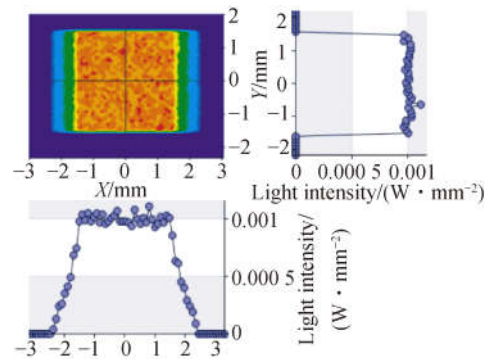


图 9 非共面扫描狭缝在掩模面产生的光强分布 (X 向和 Y 向刀片间隙 0.2 mm)

Fig. 9 Light intensity distribution at reticle plane using noncoplanar blades with 0.2 mm gap between X blades and Y blades

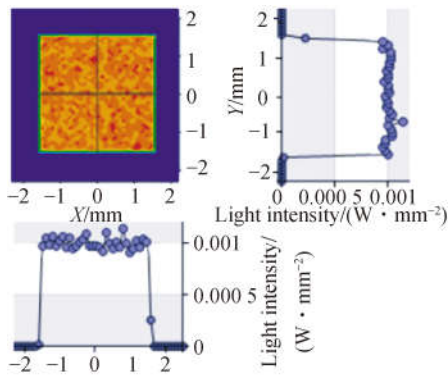


图 10 共面扫描狭缝在掩模面产生的光强分布  
Fig. 10 Light intensity distribution at reticle plane using coplanar blades

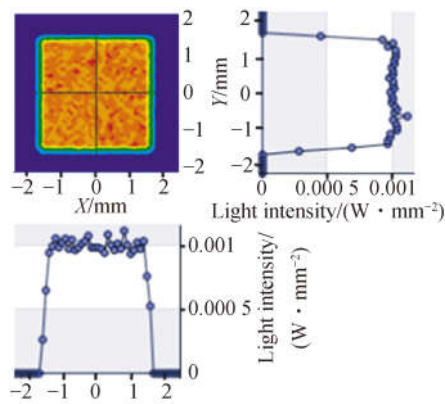


图 11 共面扫描狭缝加入刀片热变形后掩模面形成的光强分布  
Fig. 11 Light intensity distribution at reticle plane using coplanar blades with thermal deformation of all blades along z direction

### 4 扫描狭缝性能测试

步进扫描光刻机在曝光过程中,不仅要求扫描狭缝的刀口半影较小,同时对扫描狭缝的动态性能要求也较高。如果扫描刀片与掩模同步运动时动态误差较大,同样会导致掩模面上刀口像超出铬边范围,因此需要对扫描狭缝的动态误差进行测试。由于扫描狭缝仅 Y 向刀片参与扫描运动,故选取  $Y_1$  和  $Y_2$  两个刀片作为测试对象。测试最大扫描速度为 470 mm/s,加速和减速时间均为 40 ms。图 12 分别显示了两个刀片在全行程中的动态跟随误差。当刀片在启动加速(或减速)和结束加速(或减速)的瞬间,系统动态跟随误差跳动最大;当刀片进入匀速运动时,系统动态跟随误差变化趋于平缓。在整个扫描行程内,尤其是匀速运动时(扫描曝光阶段),两个刀片的最大跟随误差始终在  $\pm 30 \mu\text{m}$  以内。

将共面四刀口扫描狭缝集成到步进扫描光刻机照明系统测试平台后,调整狭缝面位置使扫描狭缝四个刀口在掩模面上呈现的刀口像最清晰。将狭缝开口设置为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,然后利用点能量探测器在掩模面中心沿 X 向和 Y 向分别进行扫描。

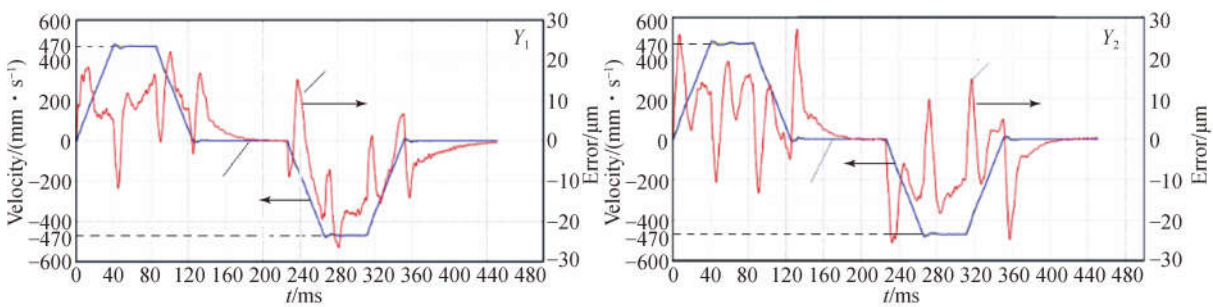


图 12 扫描刀片动态误差测试结果  
Fig. 12 Measuring results of dynamic position error of scanning blades

图 13 所示为掩模面中心分别沿两个方向的光强分布曲线。图中显示,两个方向的光强均呈相接近的梯形分布,其梯形顶部宽度约为 3 mm,底部宽度约为 4 mm,单个刀片的刀口像宽(即梯形边缘宽度)均不超过 0.5 mm。理论上,当四刀口所在的狭缝面与掩模面共轭时,掩模面上两个

方向的光强分布均应呈矩形,但实际上由于扫描狭缝系统的装调精度较低,同时刀口也存在一定的厚度和热变形,因此掩模面仍存在一定的刀口半影。假设刀口距离照明镜组物面 0.05 mm,刀口厚度和热变形分别为 0.02 mm 和 0.05 mm,则根据式(3)计算刀口半影值应为 0.38 mm。根据

光学仿真结果,掩模面上光学弥散斑直径约为 0.1 mm,考虑测量存在一定的误差,因此实际的刀口半影测量结果与理论计算值基本相同。由于

刀口半影的测试过程为静态,因此最终掩模面上刀口像的动态轮廓应为刀口半影与刀片动态误差之和。

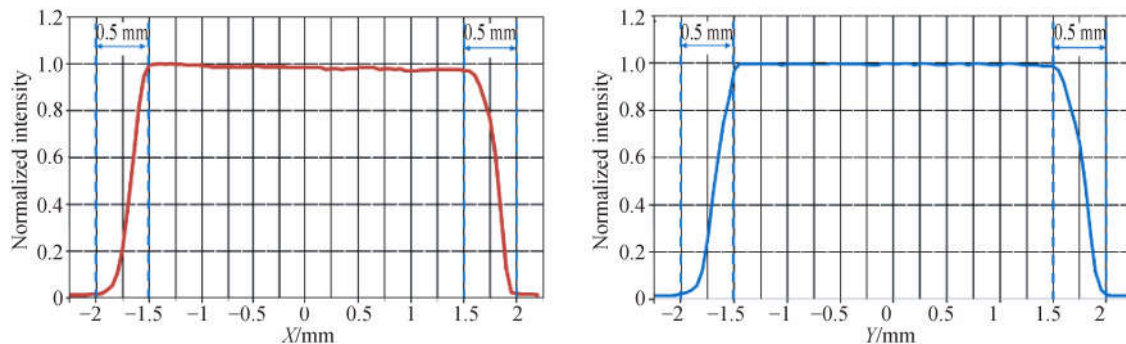


图 13 掩模面上归一化光强分布(狭缝开口设置 1 mm×1 mm)

Fig. 13 Normalized distribution of light intensity at reticle plane when setting opening of scanning slit to 1 mm×1 mm

## 5 结 论

本文针对步进扫描光刻机对刀口半影的要求,提出一种半影最小化的扫描狭缝结构设计方案。针对 NA 为 0.75 的步进扫描光刻机研制了一种四刀口共面的高精度扫描狭缝装置,实测刀

口半影不超过 0.5 mm,与刀口半影理论值相符;同时,最大扫描速度达到 470 mm/s,在此速度下扫描刀片的动态跟随误差不超过  $\pm 30 \mu\text{m}$ 。上述结果满足 90 nm 分辨率步进扫描光刻机的需求。对于更高端步进扫描光刻机的应用,可以通过优化光学系统设计、改善刀片加工工艺及提高系统装调精度来进一步减小刀口半影。

## 参考文献:

- [1] 张强,胡松,姚汉民,等. ASML 公司光学光刻技术最新进展 [J]. 微细加工技术, 2002(3): 8-11, 27.  
ZHANG Q, HU S, YAO H M, *et al.*. Current progress of optical lithography in ASML [J]. *Microfabrication Technology*, 2002(3): 8-11, 27. (in Chinese)
- [2] FAY B. Advanced optical lithography development, from UV to EUV [J]. *Microelectronic Engineering*, 2002, 61-62: 11-24.
- [3] 袁琼雁,王向朝. 国际主流光刻机研发的最新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 57-64.  
YUAN Q Y, WANG X ZH. Recent development of international mainstream lithographic tools [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(1): 57-64. (in Chinese)
- [4] 巩岩,张巍. 193 nm 光刻曝光系统的现状及发展 [J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 25-35.  
GONG Y, ZHANG W. Present status and progress in 193 nm exposure system in lithography [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008, 1(1): 25-35. (in Chinese)
- [5] MATSUYAMA T, OHMURA Y, WILLIAMSON D M. The lithographic lens: its history and evolution [J]. *SPIE*, 2006, 6154: 24-37.
- [6] LIM C M, KIM S, PARK J T, *et al.*. Study on CD variation in the vicinity of the exposure field edge in EUV lithography [J]. *SPIE*, 2012, 8322: 832210.
- [7] ZHANG Y B, ZENG A J, WANG Y, *et al.*. Illumination system without scanning slit for lithographic tools [J]. *SPIE*, 2014, 9052: 90522H.
- [8] CARTER F M, GALBURT D N, ROUX S, *et al.*. Magnetically levitated and driven reticle-masking blade stage mechanism having six degrees freedom of motion: US, 6906789 B2 [P]. 2005-06-14.
- [9] DU MEE M P D, BUIS E J, VERWEIJ A H, *et al.*. Lithographic apparatus, reticle masking device for a lithographic apparatus, gas bearing and apparatus comprising such gas bearing: US, 7307689 B2 [P]. 2007-12-11.
- [10] BINNARD M B, WATSON D C, MARGESON C S. Iron core motor driven automatic reticle blind:

- US, 7692768 B2 [P]. 2010-04-06.
- [11] ZHANG F, ZHU J, YUE W R, *et al.*. An approach to increase efficiency of DOE based pupil shaping technique for off-axis illumination in optical lithography [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4):4482-4493.
- [12] ZHANG F, ZHU J, SONG Q, *et al.*. Reducing aberration effect of Fourier transform lens by modifying Fourier spectrum of diffractive optical element in beam shaping optical system [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(30):8891-8898.
- [13] HU ZH H, ZHU J, YANG B X, *et al.*. Test of diffractive optical element for DUV lithography system using visible laser [J]. *SPIE*, 2012, 8557:855709.
- [14] CHEN M, CHEN L Q, ZENG A J, *et al.*. Generation of trapezoidal illumination for the step-and-scan lithographic system [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(22):6820-6826.
- [15] CHEN M, WANG Y, ZENG A H, *et al.*. Flat Gauss illumination for the step-and-scan lithographic system [J]. *Optics Communications*, 2016, 372:201-209.
- [16] 刘孝宁, 马世光. 镀铝合金的研究与应用 [J]. *稀有金属*, 2003, 27(1):62-65.
- LIU X N, MA SH G. Study and application of Al-Be alloy [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2003, 27(1):62-65. (in Chinese)

#### 作者简介:



林栋梁(1984—),男,安徽潜山人,博士研究生,助理研究员,2009年于上海大学精密仪器及机械专业获得硕士学位,主要从事光学精密仪器设计、高NA光学光刻技术等方面的研究。E-mail: LDLQWE@126.com

#### 导师简介:



黄惠杰(1966—),男,江苏南通人,博士生导师,研究员,1989年于浙江大学光学仪器工程学系获得学士学位,1992年、2005年于中国科学院上海光学精密机械研究所分别获得硕士和博士学位,主要从事精密光电测控技术、光学生物传感技术、光学检测技术、高NA光学光刻技术等方面的研究。E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn